



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT

EIDGENÖSSISCHES AMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

Internationale Klassifikation: G 02 f 1/18  
G 02 f 3/00

Gesuchsnummer: 13709/69

Anmeldungsdatum: 11. September 1969, 18 Uhr

Priorität: USA, 11. September 1968 (758958)

Patent erteilt: 15. Dezember 1970

Patentschrift veröffentlicht: 29. Januar 1971

G

## HAUPTPATENT

United States Atomic Energy Commission, Washington D. C. (USA)

## Elektrooptische Vorrichtung mit einer ferroelektrischen Keramikplatte

Cecil Elvin Land und Donald George Schüler, Albuquerque (N. M., USA), sind als Erfinder genannt worden

1

Die Erfindung betrifft eine elektrooptische Vorrichtung mit einer ferroelektrischen Keramikplatte. Beim Durchtreten von Licht durch das Medium kommt es zu einer sogenannten optischen Verzögerung der Lichtwellen.

Eine Folge dieser optischen Verzögerung ist die Umwandlung von monochromatischem, linear polarisiertem Licht in Licht einer anderen, z. B. elliptischen oder zirkularen Polarisationsform innerhalb einer doppelbrechenden optischen Vorrichtung. Ein monochromatisches, linear polarisiertes Lichtbündel, das auf ein optisch einachsiges, doppelbrechendes Medium senkrecht zur optischen Achse fällt, wird in zwei zueinander senkrecht polarisierte Komponenten zerlegt, und zwar in eine schnellere und eine langsamere Komponente (den sogenannten ausserordentlichen Strahl und den ordentlichen Strahl in einem negativ einachsigen Medium) entsprechend dem kleineren und dem grösseren Brechungsindex längs der c- und a-Kristallachse des Mediums. Während des Durchganges breiten sich die Komponenten also mit verschiedenen Geschwindigkeiten aus, wodurch die Phasenbeziehung zwischen den Komponenten verändert wird (Phasenverschiebung). Nachdem die Komponenten das Medium durchlaufen haben, werden sie wieder vereinigt, wobei ein einziges, im allgemeinen elliptisches polarisiertes Bündel entsteht.

Frühere Vorrichtungen haben die doppelbrechenden Eigenschaften in ferroelektrischen Einkristallen verwendet, um den Polarisationszustand des durch den Kristall hindurchgehenden Lichtes zu verändern. Wird ein linear polarisiertes Lichtbündel auf die Oberfläche eines doppelbrechenden, elliptisch polarisierenden Kristalles gerichtet, so wird ein in einer derartigen Vorrichtung angeordneter Analysator, dessen Achsen einen Winkel von 90° mit der Polarisationsrichtung des einfallenden Lichtbündels bilden, jene Komponente des elliptisch polarisierten Lichtes durchlassen, welche parallel zur Achse des Analysators ist. Diese Komponente kann dann durch eine lichtregistrierende Anordnung gemessen werden. Die Lichtdurchlässigkeit dieser bekannten Vorrichtungen

2

kann dadurch geändert werden, dass man die doppelbrechenden Eigenschaften der ferroelektrischen Kristalle verändert.

Bei einigen bekannten Vorrichtungen wird dies dadurch erreicht, dass ein ferroelektrischer Kristall etwas oberhalb seiner Curie-Temperatur erwärmt wird, so dass er paraelektrisch und optisch isotrop wird. Ein an den Kristall angelegtes elektrisches Feld bewirkt, dass der Kristall wieder doppelbrechend wird. Die Doppelbrechung ist dem Quadrat der elektrischen Feldstärke proportional, wenn diese Anordnung den elektrooptischen Kerr-Effekt zeigt. Wird das elektrische Feld abgeschaltet, so wird der Kristall wieder optisch isotrop. Derartige Vorrichtungen verlangten eine genaue Temperatursteuerung durch Heiz- oder Kühlvorrichtungen, um den Kristall in einem engen Temperaturbereich nahe seiner Curie-Temperatur zu halten.

Andere bekannte Vorrichtungen verwenden ferroelektrische Einkristallplatten, bei denen die kristallographische c- oder a-Richtung parallel zu den Hauptoberflächen ist. Kleine lokalisierte Flächen der Platte werden durch ein angelegtes elektrisches Feld geeigneter Grösse und Richtung um 90° umgeschaltet, wodurch die Doppelbrechungs- und Verzögerungseigenschaften des Kristalls verändert werden. Liegt der Kristall zwischen gekreuzten Polarisatoren, so kann die Änderung der Doppelbrechung zu einer entsprechenden Veränderung der Lichtdurchlässigkeit der Polarisator-Kristall-Analysator-Anordnung führen. Wird das Polarisationspotential entfernt, so geht der Kristall in relativ kurzer Zeit in seinen Ausgangszustand zurück, da in Einkristallen zwischen senkrecht geschalteten Domänen starke, lokale Spannungsfelder auftreten. Beispielsweise kann in Bariumtitanat die Zerfallszeit lokalisierter a-Domänen in einem c-Domänen-Kristall etwa eine Mikrosekunde oder darunter betragen, wogegen für c-Domänen in einem a-Domänen-Kristall die Zerfallszeit etwa Minuten oder Stunden betragen kann.

Der Übergangsbereich oder Saum zwischen der senkrecht geschalteten Fläche und der umgebenden, nicht

umgeschalteten Fläche kann in Einkristallen etwa eine Kristalldicke breit sein. Die Saumbreite und entsprechend die Kristalldicke begrenzt die Anzahl umgeschalteter Flächen, die in einem gegebenen Kristall vorgesehen werden können.

Die bekannten und beschriebenen optischen Verzögerungsvorrichtungen können allgemein nur auf «Ein» oder «Aus» oder, binär ausgedrückt, auf «0» oder «1» stehen. In der modernen Technologie gibt es jedoch viele Anwendungsmöglichkeiten für Vorrichtungen mit mehr als zwei stabilen Zuständen, wie beispielsweise in ternären oder octonären Speicheranordnungen, in Analoggedächtnissen und in zugehörigen logischen Schaltungen.

Bei bekannten polykristallinen Keramiken wurde festgestellt, dass man unter dem Einfluss geeigneter elektrischer Felder der Keramik bleibende Polarisations-eigenschaften geben kann, einschliesslich pyroelektrischer und piezo-elektrischer Wirkungen. In thermisch depolarisiertem Zustand sind die ferroelektrischen Domänen innerhalb der Kristallite oder Körner statistisch orientiert, so dass die Keramik makroskopisch isotrop ist. Wird ein polarisierendes Feld angelegt, so wachsen die zum Feld günstig orientierten Domänen auf Kosten weniger günstig orientierter Domänen, wodurch die Keramik makroskopisch anisotrop werden kann. Das elektroofte Verhalten dieser polarisierten Keramiken kann in zwei Funktionsklassen eingeteilt werden, welche hauptsächlich von den Korndurchmessern in der Keramik abhängen. Grobkörnige Keramiken mit Nennkorngrössen im allgemeinen grösser als etwa 2 Mikron depolarisieren durchgelassenes Licht fast völlig und streuen das Licht in Abhängigkeit von der Richtung der elektrischen Polarisation in gewisse räumliche Verteilungen. Polarisierte feinkörnige Keramiken mit Nennkorngrössen im allgemeinen von ungefähr zwei Mikron oder darunter sind doppelbrechend, und zwar axialsymmetrisch in bezug auf die optische Achse (Richtung der elektrischen Polarisation). Die Lichtdurchlasseigenschaften einer optischen Vorrichtung mit Polarisator, keramischer Platte und Analysator können stufenweise verändert werden, indem man die Richtung der optischen Achse der Keramik in einer Ebene senkrecht zu einem Bündel polarisierten, die Vorrichtung durchlaufenden Lichtes verändert, um die Intensität des durchgelassenen Lichtbündels in einer Anzahl von Stufen zu verändern.

Diese Keramiken haben die Eigenschaft, dass kleine, lokalisierte Flächen einer dünnen Platte dauerhaft und in vielfältiger Weise unabhängig voneinander geschaltet sein können, ohne die Lichtdurchlasseigenschaften der umgebenden Bereiche zu verändern, abgesehen von einem schmalen «Saum» um jeden geschalteten Bereich. Die Breite dieses Saumes hängt von der Korngrösse ab und ist im wesentlichen unabhängig von der Dicke der Keramik.

Die elektroofte Vorrichtung nach der Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, dass die polykristalline Platte derart feinkörnig ist, dass sie optisch doppelbrechend wirkt, dass die Platte eine Anzahl stabiler elektrischer Polarisationszustände oberhalb der elektrischen Nullpolarisation sowie eine elektrische Anfangsremanzpolarisation bei einem dieser Zustände in einer bestimmten Richtung aufweist, ferner gekennzeichnet durch Mittel, der Platte polarisiertes Licht zuzuführen, durch Mittel, um die Grösse der elektrischen Polarisation der Platte in der genannten Richtung und damit die Grösse der genannten Doppelbrechung zu verändern

und durch Mittel, um die Änderung der Doppelbrechung zu erfassen.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand der Zeichnungen beispielsweise beschrieben. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische und zum Teil perspektivische Ansicht einer elektroofte Verzögerungsvorrichtung mit einer feinkörnigen ferroelektrischen Keramikplatte und einer Elektrodenanordnung zum Verändern der Doppelbrechung der Keramikplatte;

Fig. 2 ein Kurvenbild, in dem die Polarisierung über dem angelegten elektrischen Feld für ein ferroelektrisches Element gemäss Fig. 1 aufgetragen ist;

Fig. 3 ein Kurvenbild, in dem die Verzögerung über der Polarisierung für das ferroelektrische Element von Fig. 1 für eine bestimmte chemische Zusammensetzung des Elementes aufgetragen ist;

Fig. 4 ein Kurvenbild, in welchem die Verzögerung über der Polarisierung für das ferroelektrische Element von Fig. 1 für eine andere chemische Zusammensetzung des Elementes aufgetragen ist;

Fig. 5 ein Kurvenbild, in dem die Änderung der Verzögerung mit dem angelegten elektrischen Feld oberhalb der Sättigungsremanz dargestellt ist;

Fig. 6 den Aufriss einer in Matrixform angeordneten Elektrodenanordnung auf einer ferroelektrischen Keramikplatte und

Fig. 7 einen Querschnitt längs der Linie A-A' der Matrixanordnung von Fig. 6.

In Fig. 1 ist eine Ausführungsform der Erfindung dargestellt. Die Vorrichtung weist eine elektrisch gesteuerte optische Verzögerungsvorrichtung 10, eine Lichtquelle 12, einen Linearpolarisator 14 mit der durch den Pfeil  $E_1$  bezeichneten bevorzugten Durchlassrichtung, einen Linearanalysator 16 mit der durch den Pfeil  $E_2$  bezeichneten bevorzugten Durchlassrichtung, ein geeignetes lichtempfindliches Gerät 18 (z. B. Photomultiplier oder Photodiode) sowie eine Auswertevorrichtung 19 auf. Jedes dieser Bauelemente kann längs der Z-Achse (wie dargestellt) in einer gewünschten Winkelstellung zur X- und Y-Achse angeordnet sein, wie dies später noch angegeben werden wird. Die Lichtquelle 12 kann irgendeine konventionelle Lichtquelle oder eine Quelle weissen Lichtes sein, wie beispielsweise eine Glühlampe oder eine Quecksilberbogenlampe oder für gewisse besondere Anwendungszwecke eine monochromatische oder Schmalbandlichtquelle (z. B. ein Laser oder eine Lichtquelle mit einem Filter), die ein Lichtbündel längs der Z-Achse aussendet. Auch kann die Lichtquelle einen Kollimator mit besonderen optischen Linsen- oder Fasersystemen aufweisen. Die optische Verzögerungsvorrichtung 10 bewirkt eine Beeinflussung der Farbe des Lichtes einer Quelle weissen Lichtes bzw. der Intensität des Lichtes einer monochromatischen Lichtquelle, welches auf das lichtempfindliche Gerät 18 auftrifft.

Die optische Verzögerungsvorrichtung 10 weist eine optisch einachsige, polykristalline, ferroelektrische, keramische, polierte dünne Platte 20 auf, mit einer Vielzahl von Körnern gleicher Nennkorngrösse, vorzugsweise von unter 2 Mikron, mit einer anfänglich gleichen Remanz, einer Dichte von über 98 % des theoretischen Wertes sowie maximaler Homogenität, Lichtdurchlässigkeit, Oberflächenglätte und Spannungsfestigkeit. Meist müssen derartige Materialien heiss gepresst werden, um diese Eigenschaften zu erzielen. Der maximale Korndurchmesser hängt von der Zusammensetzung der Körner ab und kann manchmal grösser als 2 Mikron sein.

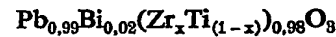
Eine ferroelektrische Keramik mit den gewünschten elektrooptischen Eigenschaften wird im folgenden als «feinkörnige Keramik» bezeichnet. Die Platte 20 ist aus Gründen der Darstellung in Fig. 1 mit übertriebener Dicke dargestellt. Feinkörnige ferroelektrische Keramikplatten zeigen die gewünschten Lichtdurchlässigkeits- und Verzögerungseigenschaften bei verschiedenen Dicken in der Grössenordnung von 20 bis 250 Mikron in Abhängigkeit von der optischen Durchlässigkeit des Materials.

Für die Zwecke der erfindungsgemässen Vorrichtung ist die ferroelektrische Keramik dann optisch einachsig, wenn sie elektrisch polarisiert und in ihrer Wirkung optisch einachsig ist, d. h. die Symmetrieeigenschaften eines optisch einachsigen, doppelbrechenden Kristalls zeigt. Die einzelnen Körner oder Kristallite einer optisch einachsigen Keramik können entweder eine einachsige (tetragonale, trigonale [rhomboedrisch] und hexagonale) Symmetrie oder die allgemeine zweiachsige (orthorhombische, monokline und triklin) Symmetrie aufweisen. Eine elektrisch polarisierte, feinkörnige, ferroelektrische Keramik ist im allgemeinen in einer der Richtung der elektrischen Polarisierung parallelen Ebene doppelbrechend. Sind die einzelnen Kristallite negativ doppelbrechend, so ist die Richtung der elektrischen Polarisierung die «schnelle» Achse der Keramik; sind die Kristallite positiv doppelbrechend, so ist die Richtung der elektrischen Polarisierung die «langsame» Achse der Keramik. Die effektive Doppelbrechung einer ferroelektrischen Keramikplatte hängt von der Grösse der elektrischen Polarisierung in einer gegebenen Richtung ab, d. h. davon, ob die Keramik ganz oder nur zum Teil in einer bestimmten Richtung polarisiert ist. Die Orientierung der optischen Achse hängt von der Richtung der elektrischen Polarisierung in der Keramik ab, welche in dem Ausführungsbeispiel von Fig. 1 am Anfang in Richtung des Pfeiles 21, parallel zur Y-Achse, liegt. Die Lichtdurchlässigkeitseigenschaften der Verzögerungsvorrichtung 10 können dadurch elektrisch gesteuert werden, dass die Grösse ihrer ferroelektrischen Polarisierung durch Anwendung eines äusseren elektrischen Feldes geändert wird. An die Platte 20 kann ein elektrisches Feld angelegt werden, indem geeignet gewählte Impulse über ein Paar oder einen Satz von Elektroden 22 und 24 der Platte zugeführt werden. Diese Elektroden sind einander gegenüberliegend quer über der Platte 20 angeordnet, voneinander durch eine auf der Hauptoberfläche befindliche Polarisationsfläche 25 getrennt und in der anfänglichen Richtung der optischen Achse der Platte 20 ausgerichtet. Ein zweiter, nicht dargestellter Satz von Elektroden kann an der entgegengesetzten Hauptoberfläche der Platte 20 direkt gegenüber den Elektroden 22 und 24 angeordnet und parallel mit diesen verbunden sein, um eine gleichförmige Feldverteilung durch die gesamte Dicke der Platte 20 hindurch in der Fläche 25 sicherzustellen.

Ein Impuls geeigneter Polarität, Amplitude und Dauer kann mittels eines Impulsgenerators 26 den Elektroden 22 und 24 zugeführt werden, um zwischen dem Elektrodenpaar elektrische Felder zu erzeugen, die parallel zur Ebene der Oberfläche, auf welcher die Elektroden aufgebracht sind, und parallel zur ursprünglichen Richtung 21 der Polarisierung sind. Die Impulsamplitude und -breite können derart gewählt werden, dass stufenweise ein teilweises Umschalten der Polarisierung der Keramik erfolgt. Die Impulsamplitude ist derart zu wählen, dass die gewünschte Umschaltgeschwindigkeit

erzielt wird; die Impulsbreite ist derart zu wählen, dass die gewünschte Änderung der Polarisierung stattfindet. Stufenweises Umschalten der Polarisierung der keramischen Platte bewirkt entsprechende zusätzliche Änderungen der Doppelbrechung. Typische Impulsbreiten und Impulsamplituden sind 0,1 bis 100 Mikrosekunden und etwa 5 bis 40 kV/cm, je nach der Plattendicke und -zusammensetzung.

Die keramische Platte 20 kann aus irgendwelchen heissgepressten, ferroelektrischen keramischen Mischkristallen bestehen, wie beispielsweise Bariumtitanat, Natrium-Kalium-Niobat und Bleizirkonat-Bleitanat, mit einer Korngrösse von unter 2 Mikron, hoher Dichte und hoher Homogenität. Eine typische ferroelektrische Keramik besteht z. B. aus Bleizirkonat-Bleitanat-Mischkristallen mit der allgemeinen Formel



wobei x zwischen 0,95 und 0,45 variieren kann. Der Zusatz – hier Wismut – kann irgendein geeignetes Material sein, wie z. B. Lanthan und Niob, von 0,1 bis 4 Atomprozenten. Eine typische Keramik kann ein Verhältnis von 65 Molprozent  $\text{PbZrO}_3$  zu 35 Molprozent  $\text{PbTiO}_3$  haben und zwei Atomprozent Wismut als  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  enthalten. Diese Mischkristalle können in folgender Weise hergestellt werden:

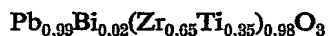
1. Abwiegen der Oxydpulver
2. feuchtes Durchmischen in einer geeigneten Flüssigkeit
3. Trocknen
4. Kalzinieren bei einer Temperatur von etwa 800 °C während ungefähr einer Stunde
5. Granulation und Nassmahlen des Produktes der Kalzination, um die teilweise zusammengesinterten Teilchen-Aggregate zu zerbrechen
6. Trocknen
7. Kalt-Pressen des Pulvers zu einer Scheibe und
8. Heiss-Pressen bei einer Temperatur von etwa 800 °C bis ungefähr 1050 °C etwa ein bis 24 Stunden mit einem Druck von etwa 0,35 bis 14 kg/mm<sup>2</sup>

Die Korngrösse kann durch geeignete Wahl chemischer Umwandler oder Zusätze, welche die gewünschten elektrischen Eigenschaften herbeiführen, jedoch das Kornwachstum hemmen (wie z. B.  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$  oder  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ), durch Wahl von Oxydpulver mit genügender chemischer Reinheit (im allgemeinen grösser als etwa 99,2 %) und durch richtige Wahl der Heisspressbedingungen, nämlich Temperatur, Zeit und Druck, beeinflusst werden. Nach dem Heisspressen wird die Scheibe in dünne Platten zerschnitten, und die Hauptoberflächen werden poliert, bis sie optische Qualität erhalten. Dann werden die Platten etwa 15 Minuten bei etwa 500 bis 700 °C ausgeglüht, bei Raumtemperatur abgekühlt und die Elektroden aufgebracht. Schliesslich wird die Platte bis zur gewünschten gleichmässigen Ausgangspolarisation elektrisch polarisiert. Das Material zeigt bei Raumtemperatur die gewünschten elektrooptischen Eigenschaften. Das Material kann mit gewünschter Korngrösse hergestellt werden, indem man die geeigneten Heisspressbedingungen auswählt. Beispielsweise wird man zur Erzeugung einer Korngrösse von etwa

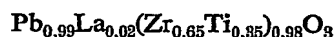
1 Mikron die kalzinierte Scheibe bei einer Temperatur von etwa 1000 bis 1050 °C ungefähr 4 Stunden bei etwa 5,6 kg/mm<sup>2</sup> pressen.

In einer heissgepressten, ferroelektrischen Keramikplatte mit einer ferroelektrischen Ausgangspolarisation können die Spannungsfelder zwischen verschiedenen orientierten Domänen schwach im Vergleich zu jenen in einem Einkristall sein. Daher neigt die geschaltete Fläche nicht dazu, in ihren ursprünglichen Polarisationszustand zurückzukehren, sondern bewahrt ihren Zustand, bis ein geeignetes Schaltfeld angelegt wird, um die Orientierung zu ändern. Ferner können diese feinkörnigen ferroelektrischen Keramiken zusätzlich durch geeignete Wahl der Schaltimpulse zwischen Null und einer entweder positiven oder negativen Sättigungsremanenz-Polarisation ( $P_s$ ) auf irgendeinen einer Mehrzahl von stabilen Polarisationszuständen stufenweise umgeschaltet werden, wie dies an den Punkten 28a, 28b, 28c, 28d, 28e in Fig. 2 dargestellt ist. Gewisse ferroelektrische Keramiken können 10 oder mehr stabile Polarisationszustände oberhalb der Nullpolarisation haben.

Der Einfluss der Grösse der Polarisation auf die relative Verzögerung  $\Gamma/\Gamma(P_s)$ , wobei  $\Gamma(P_s)$  die Verzögerung bei positiver und negativer Sättigungsremanenz (Punkte 28a und 28e) ist, ist in Fig. 3 dargestellt. Eine keramische Platte aus Bleizirkonat-Bleitanat-Mischkristallen der Formel



wurde ursprünglich bis zur positiven Sättigungsremanenz parallel zu den Hauptflächen und senkrecht zu den Elektroden 22 und 24 polarisiert. Die Verzögerung wurde bei diesem Remanenzzustand gemessen. Die Polarisation wurde dann stufenweise von der positiven zur negativen Sättigungsremanenz umgeschaltet und die Verzögerung bei jedem dazwischenliegenden Remanenzzustand gemessen. Fig. 3 zeigt, dass beim Umschalten der relativen Polarisation von der positiven Sättigungsremanenz +1,0 auf Null (d. h. in den elektrisch unpolarisierten Zustand), die relative Verzögerung um etwa 30 % abnimmt. Wenn die relative Polarisation von Null auf die negative Sättigungsremanenz -1,0 umgeschaltet wird, so wächst die relative Verzögerung auf den Ursprungswert +1,0. Kehrt man die Polarität des Schaltfeldes um und wiederholt die Verzögerungsmessungen, wobei die relative Polarisation von -1,0 auf +1,0 übergeht, so erhält man die vollständige, geschlossene Kurve nach Fig. 3. Die beiden Kurven unterscheiden sich infolge der Hysterese. Die geschlossene Kurve zeigt eine bis zu 30%ige Änderung der Verzögerung, wenn die Polarisation von der einen Sättigungsremanenz auf die andere umgeschaltet wird. Änderungen von 70 % wurden für Bleizirkonat-Bleitanat-Mischkristalle mit der Formel



erhalten, wie dies in Fig. 4 dargestellt ist. Diese Figur zeigt ausserdem die Verzögerung als Funktion der Polarisation für eine Probe, die ursprünglich thermisch depolarisiert ist, d. h. sich in einem statistischen Polarisationszustand befindet. Die Doppelbrechung der thermisch depolarisierten Probe ist Null und wächst nahezu linear mit der Polarisation, wie dies die Kurve 32 darstellt. Dieser Teil der Kurve kann auch für einmalige

Anwendungen der vorliegenden Erfindung bei wiederholbarer thermischer Depolarisation benutzt werden.

Wenn bei Sättigungsremanenz ein elektrisches Feld in Sättigungsrichtung angelegt wird, so wird die relative Verzögerung und die Polarisation weiter über den Punkt 28a hinaus erhöht, wie dies durch die Kurve 30 in Fig. 3 wiedergegeben ist. Ein elektrisches Feld, das in dieser Weise angelegt ist, erzeugt keine irreversible Domänenumschaltung, da bei Abschalten des Feldes die Verzögerung auf ihren ursprünglichen Wert bei Sättigungsremanenz zurückgeht. Dieser reversible elektrooptische Effekt kann unter Umständen zur Lichtmodulation und für die kurzzeitige Öffnung von Verschlüssen verwendet werden, wie dies weiter unten beschrieben ist. Fig. 5 zeigt den reversiblen elektrooptischen Effekt oberhalb der Sättigungsremanenz in einer mit Lanthan gedopten Bleizirkonat-Bleitanat-Keramik ( $x=0,65$ ). Die Verzögerung ändert sich etwa mit dem Quadrat des angelegten elektrischen Feldes. Eine Viertelwellenlänge Verzögerung kann durch ein Feld von 1,32 kV/mm zwischen den Elektroden bei einer 50 Mikron dicken Platte erhalten werden. Grössere Verzögerungsänderungen können dadurch erreicht werden, dass die Plattendicke vergrössert wird.

Es ist zu beachten, dass die wirksame Doppelbrechung maximal ist, wenn der Winkel zwischen der Richtung der elektrischen Polarisation der keramischen Platte und der Lichtausbreitungsrichtung 90° beträgt. Sie ist Null, wenn der Winkel 0° ist.

Änderungen der wirksamen Doppelbrechung können angezeigt werden, wenn die Keramikplatte gemäss Fig. 1 zwischen einem Linearpolarisator und einem Analysator angeordnet wird. Wieviel der von einer monochromatischen Lichtquelle oder von einer Quelle weissen Lichts stammenden Lichter durch die elektrooptische Vorrichtung der Fig. 1 durchgelassen werden, hängt von der Grösse und der Richtung der elektrischen Polarisation der Keramik ab. Wenn die Polarisationsrichtung der Keramik in der xy-Ebene liegt und in bezug auf die Polarisationsrichtung  $E_1$  des Lichtes derart orientiert ist, dass  $\psi - \alpha = \pm 45^\circ$  ist (wobei  $\alpha$  der Winkel zwischen der Polarisationsrichtung der Keramik und der x-Achse ist) und wenn das monochromatisch einfallende Licht die Wellenlänge  $\lambda_0$  hat, so ist das von der keramischen Platte durchgelassene Licht im allgemeinen elliptisch polarisiert. Wenn nun die Dicke der keramischen Platte so gewählt ist, dass die Verzögerung

$$\Gamma_1 = \frac{(2N-1)}{2} \lambda_0 \quad (N \text{ ganzzahlig})$$

ist, dann ist das von der keramischen Platte durchgelassene Licht linear polarisiert, jedoch um -90° zum einfallenden Strahl. Wenn  $\Gamma = \Gamma_1$  und  $\phi = 0^\circ$  ist, so erscheint am Ausgang des Analysators kein Licht. In ähnlicher Weise ist, falls  $\Gamma_2 = N \lambda_0$ , das von der keramischen Platte durchgelassene Licht wieder linear polarisiert, aber gleichgerichtet mit der Polarisation des einfallenden Bündels. Demgemäss wird, wenn  $\Gamma = \Gamma_2$  und  $\phi = 90^\circ$ , kein Licht durch die Vorrichtung hindurchgelassen.

Befindet sich die Vorrichtung in einer der beschriebenen Sperrstellungen, so bewirkt eine Änderung in der Verzögerung, dass Licht durch die elektrooptische Vorrichtung durchgelassen wird, gerade so, wie wenn eine

Blende geöffnet würde. Das Licht wird somit durchgelassen, wenn die ferroelektrische Polarisierung um einen diskreten Zuwachs, ausgehend von ihrem Wert in Sperrstellung, umgeschaltet wird. Wenn sie dann auf ihren ursprünglichen Wert bei Sättigungsremanenz zurückgeschaltet wird, so wird das Licht gesperrt.

Wenn die Vorrichtung ursprünglich in Sperrstellung steht, so wird eine Änderung der Verzögerung um  $\Delta T = \lambda_0/2$  den grössten Lichtdurchlass durch die Vorrichtung hervorrufen. Stufenweise Änderungen der Verzögerung, die kleiner als  $\lambda_0/2$  sind, führen zu Zwischenwerten des Lichtdurchlasses zwischen Null und dem Maximum. Demgemäss braucht das Licht-Tor nicht einfach ein Ein-Ausschaltgerät zu sein, sondern kann als mehrstufige Blende dienen. Experimentelle Ergebnisse zeigen, dass 10 oder mehr diskrete Durchlasspegel bei einer derartigen Vorrichtung möglich sind.

Wenn die keramische Platte ursprünglich auf die Sättigungsremanenz polarisiert ist und die Vorrichtung der Fig. 1 in Sperrstellung steht, so kann ein in Sättigungsrichtung angelegtes elektrisches Feld den Durchlass von Licht durch die Vorrichtung hindurch ermöglichen. Nach Abschalten des Feldes kann die Verzögerung auf den Ausgangswert bei Sättigungsremanenz zurückkehren, da keine irreversible Domänen-Umschaltung erfolgt. Eine typische reversible Charakteristik, in der die Verzögerung über der Polarisierung dargestellt ist, zeigt die Kurve 30 in Fig. 3, wobei die Polarisierung über die Sättigungsremanenz  $P_1$  steigt. Die Lichtdurchlässigkeit, die bei einem bestimmten, angelegten Feld auftritt, kann leicht mathematisch vorausgesagt werden. Bei dieser Arbeitsart arbeitet der keramische Körper in Verbindung mit dem Polarisator und dem Analysator wiederum als Lichtblende. Die Durchlässigkeit der Vorrichtung hängt jedoch stetig vom angelegten Feld ab.

Infolge der Schalteigenschaften der ferroelektrischen keramischen Platten können Lichtverschlüsse, -blenden oder -modulatoren ausgeführt werden, die nur eine einzige keramische Platte verwenden, wie es in der die Informationsstellen 1-1 bis 2-7 aufweisenden  $4 \times 4$ -Matrix der Fig. 6 und 7 dargestellt ist. Mit monochromatischem oder weissem Licht zum Abfragen kann eine Anordnung von vielstufigen Lichtblenden auf einer keramischen Platte ein vielstufiges Gedächtnis bilden, das optisch abgelesen sowie durch übliche Schaltkreise und nicht dargestellte logische Kreise, die an x-Adressen-Elektroden  $x_1$  und  $x_2$  und an y-Adressen-Elektroden  $y_1$  bis  $y_8$  angeschlossen sind, geschaltet werden kann. Eine derartige Anordnung, wie sie in den Fig. 6 und 7 dargestellt und in bezug auf die Informationsstellen 1-1 und 1-2 beschrieben ist, kann aus einer in geeigneter Weise hergestellten ferroelektrischen Keramikplatte 40, einer x-Adressen-Elektrode 42 ( $x_1$ ), einer y-Adressen-Elektroden-Paar 46 und 48 ( $y_1$  und  $y_2$ ) und Isolierschichten 44 und 45 zwischen den x- und y-Adressen-Elektroden bestehen. Die x-Adressen-Elektrode 42 kann einen erweiterten Abschnitt oder ein Feld 50 aufweisen, welches direkt auf der Oberfläche der Platte 40 bei jeder der Informationsstellen liegt. Die y-Adressen-Elektrode 46 kann entsprechend ein Teil 52 aufweisen, das senkrecht von ihr in Richtung auf die Elektrode 48 und parallel zum Feld 50 vorsteht. Die y-Adressen-Elektrode 48 kann ebenso ein Teil 54 aufweisen, das senkrecht von ihr in Richtung zur Elektrode 46 und parallel zum Feld 50 vorsteht, jedoch auf der Seite, die dem Teil 52 entgegengesetzt ist. Die Teile 52 und 54 können gemäss Fig. 7 einen ersten Abschnitt aufweisen, der sich längs

der Oberfläche von Isolierschichten 44 bzw. 45 bis zu deren Kante erstreckt, und einen zweiten Berührungsabschnitt, der direkt auf der Oberfläche der Platte 40 liegt. Dieser zweite Berührungsabschnitt der Teile 52 und 54 und der erweiterte Abschnitt 50 der x-Adressen-Elektrode 42 haben vorzugsweise einen rechteckigen oder quadratischen Grundriss mit scharfen Ecken, die die Platte 40 gut berühren, um eine gleichförmige Verteilung des elektrischen Feldes innerhalb jeder Informationsstelle und eine Minimalisierung der gegenseitigen Beeinflussung verschiedener Informationsstellen zu erreichen. Da die Informationsstelle 1-1 durch Isolierschichten 44 und 45, den zweiten Abschnitt des Teiles 52 sowie den erweiterten Abschnitt 50 begrenzt ist, kann die Informationsstelle 1-1 durch Anlegen eines geeigneten Impulses zwischen den Elektroden 42 und 46 umgeschaltet werden. Die Informationsstelle 1-2 kann durch Anlegen eines geeigneten Impulses zwischen den Elektroden 42 und 48 umgeschaltet werden. Die elektrische Feldverteilung kann weiter verbessert werden, indem man einen doppelten Satz von geeignet miteinander verbundenen Elektroden an der entgegengesetzten Oberfläche der Keramikplatte 40 vorsieht, wie das in Fig. 7 durch die entsprechend nummerierten Elektroden 42', 46' und 48', Isolierschichten 44' und 45' sowie Feld 50' und Teil 52' dargestellt ist. Die Elektroden, wie die Elektroden 42 und 42', können miteinander durch eine leitfähige Schicht verbunden sein, die auf das Ende der Platte 40 aufgebracht ist, um eine Verbindung des Matrixsystems mit einem anderen Schaltkreis durch konventionelle gedruckte Einschübe zu ermöglichen. Die gleiche Elektrodenanordnung kann für die übrigen Informationsstellen wiederholt werden.

Die Elektroden 42, 46 und 48 können aus irgendeinem geeigneten leitfähigen, transparenten oder undurchsichtigen Material bestehen und auf die Platte mit gewünschten Dimensionen und gewünschter Leitfähigkeit aufgebracht werden. Isolierschichten 44 und 45 können aus irgendeinem geeigneten transparenten oder undurchsichtigen Isoliermaterial, z. B. Siliziumoxyd, bestehen, das bequem in der gewünschten Anordnung aufgebracht werden kann.

Die x-Adressen-Elektroden können zuerst auf die Keramikplatte mit konventioneller Aufdampfungs- oder anderen Niederschlags- und Maskierungsmethoden aufgebracht werden. Die Isolierschichten und y-Adressen-Elektroden können dann in der dargestellten Reihenfolge über die x-Adressen- und den y-Adressen-Elektroden aufgebracht werden, um die Matrix zu vervollständigen. Die Isolierschichten sollten genügend dick sein, um den Schaltspannungen zu widerstehen, die zwischen den x-Adressen-Elektroden angelegt werden. Wahlweise können auch die verbreiterten Abschnitte 50 an den x-Adressen-Elektroden weggelassen und eine grössere Bit- oder Informationsdichte dadurch erzielt werden, dass man Isolierschichten zwischen den x-Adressen-Elektroden und der Keramikplatte direkt unterhalb der Isolierschichten 44 und 45 anordnet. Bei dieser Ausführungsform berühren die x-Adressen-Elektroden die Keramikplatte mit den gewünschten scharfen Ecken, vergleichbar den Teilen 52 und 54 an den y-Adressen-Elektroden.

In der Fig. 6 und 7 dargestellten Anordnung können die y-Adressen-Elektroden und die x-Adressen-Elektroden vorteilhaft 0,24 mm breit sein und die verbreiterten Abschnitte der x-Adressen-Elektroden etwa 0,72 mm im Quadrat messen. Bei diesen Abmessungen können die

einzelnen schaltbaren Bereiche etwa  $0,72 \times 0,72$  mm messen, wobei etwa 50 % der Platte Informationsflächen sind. Die Bit-Dichte auf einer derartigen Anordnung kann etwa 25 000 Bits pro  $6,5 \text{ cm}^2$  betragen.

Eine Anordnung von Lichtblenden, die eine Vielzahl von Zuständen haben können, auf einer einzigen Keramikplatte, wie sie in Fig. 6 und 7 dargestellt ist, kann zur Bilddarstellung verwendet werden. Wird die Platte mit monochromatischem Licht beleuchtet, so ist die Lichttransmission durch die optische Vorrichtung hindurch durch den Polarisationszustand der Keramikplatte an jeder Stelle bestimmt. Mittels stufenweiser Steuerung der Durchlässigkeit jeder Stelle der Platte hat das Bild eine Grauskala.

Eine Anordnung von momentan offenen Blenden oder Verschlüssen eignet sich für die Darstellung von nur kurze Zeit bestehenden Bildern. Diese Anordnung hat den Vorteil, dass keine irreversible Domänen-Umschaltung von der Keramik verlangt wird.

Fällt weisses Licht auf die Vorrichtung nach Fig. 1 oder Fig. 6, so kann jede Wellenlänge des Lichtes um einen Betrag verzögert werden, der von ihrer Frequenz abhängt. Die maximale und minimale Durchlässigkeit kann gleichzeitig bei verschiedenen Wellenlängen des Spektrums auftreten. Ist beispielsweise  $\phi = 90^\circ$  und  $\psi - \alpha = \pm 45^\circ$ , so ist die Durchlässigkeit T dann ein Maximum, wenn

$$\lambda = \frac{2 \Gamma}{2 N - 1}$$

und dann ein Minimum, wenn  $\lambda = \Gamma/N$ , wobei N ganzzahlig ist. Ist beispielsweise

$$\frac{2 \Gamma}{2 N - 1} = 0,550 \text{ Mikron}$$

so kann die Vorrichtung grünes Licht ( $\lambda = 0,55$  Mikron und benachbarte Wellenlängen) durchlassen und Komponenten in Richtung zum roten und violetten Ende des sichtbaren Spektrums auslöschen. Da  $\Gamma$  von der remanenten Polarisation abhängt, ergibt sich, dass beim Umschalten der Polarisation sich auch  $\Gamma$  verändert, und die grössten und kleinsten Werte der Lichtdurchlässigkeit können bei anderen Wellenlängen erreicht werden. Dies bedeutet einfach, dass beim Umschalten der Polarisation zu grösseren Werten hin sich das von der Vorrichtung Fig. 1 durchgelassene Licht von Grün nach Gelb und weiter nach Rot verschiebt. Ist eine Anordnung von stufenweise geschalteten Flächen auf einer einzigen Keramikplatte vorgesehen, so ergibt sich eine vielfarbige Aufzeichnung.

Eine Anordnung von momentan offenen Blenden oder Verschlüssen, beleuchtet von einer Weisslichtquelle, kann auch zur Darstellung von kurz bestehenden vielfarbigen Bildern verwendet werden. In dieser Anordnung hängt die Farbe an einer gewissen Stelle der Aufzeichnung vom elektrischen Feld, das an dieser Stelle angelegt ist, ab. Diese Art von Anordnung hat den Vorteil, dass keine irreversible Domänen-Umschaltung von der Keramik gefordert wird.

Ein keramischer, elektrooptischer Lichtmodulator kann bei irgendeiner bestimmten, von der verbleibenden

Polarisation abhängigen Verzögerung arbeiten, wobei die Veränderung des elektrischen Feldes eine entsprechende Änderung der Verzögerung erzeugt. Bei durch kleine Signale erzeugten Modulationsfeldern ist die Veränderung der Verzögerung linear; bei stärker modulierten Feldern ändert sich die Verzögerung mit dem Quadrat des angelegten Feldes, wie dies in Fig. 5 dargestellt ist. Wenn die remanente Polarisation der Keramik um einen bestimmten Zuwachs von ihrem Ausgangswert geändert wird, so ändert sich auch die Beziehung zwischen der Verzögerung und dem angelegten Modulationsfeld (d.h. der Modulationsindex) um einen bestimmten Wert. Hieraus ergibt sich ein elektrisch veränderlicher Modulationsindex.

Zusätzlich zu den beschriebenen Geräten mit einer einzigen keramischen Platte und einem Linear-Polarisator und -Analysator können viele neue Vorrichtungen zwei oder mehr keramische Platten benutzen. Beispielsweise kann ein Koinzidenz-Gedächtnis aus einem veränderlichen Gedächtnis auf einer Keramikplatte und einem permanenten Gedächtnis auf einer zweiten Platte bestehen. Die vollständige optische Vorrichtung besteht dann beispielsweise aus einem Linearpolarisator, dem permanenten Gedächtnis, dem veränderlichen Gedächtnis und einem Linearanalysator, die ähnlich wie in Fig. 1 angeordnet sind. Wenn die einzelnen Bits des permanenten Gedächtnisses so angeordnet sind, dass sie sich räumlich mit denen des veränderlichen Speichers (Gedächtnisses) decken, wenn die Bits des permanenten Speichers um einen Winkel von  $90^\circ$  gegenüber den Bits des veränderlichen Speichers geschaltet werden, wenn die Verzögerungen der beiden keramischen Platten bei Sättigungspolarisation gleich sind und wenn das permanente Gedächtnis genau mit dem veränderlichen koinziiert, so erfolgt eine vollständige Auslöschung bei gekreuztem Polarisator und Analysator. Wenn die beiden Speicher nicht vollständig koinzidieren, kann die durchgelassene Lichtintensität proportional der Korrelationsfunktion der beiden Speicher sein. Eine Koinzidenz-Adresse kann auch optisch durch ein ähnliches System erhalten werden.

Die beschriebene Vorrichtung verwendet somit ferroelektrische Keramik zur optischen Verzögerung, wobei diese Keramik mindestens zwei optisch unterscheidbare Informationsspeicherzustände aufweist, die gelöscht und wieder gespeichert werden können. Die Verzögerung kann stufenweise oder kontinuierlich ohne irreversible Domänenumschaltung geändert werden. Diese Vorrichtung kann auch vielfarbige Bilder wiedergeben. Ferner kann sie einen mit einer ferroelektrischen Keramik versehenen optischen Modulator oder Verschluss bilden.

Vorteile gegenüber dem Stande der Technik sind u. a.:

- a) eine optische Verzögerungsvorrichtung mit zwei oder mehr optisch unterscheidbaren Informationsspeicherzuständen;
- b) eine optische Verzögerungsvorrichtung, die wiederholt und stufenweise auf jeden der Zustände geschaltet werden kann;
- c) eine optische Verzögerungsvorrichtung, die in jedem der Zustände eine verschiedene Farbe herstellen kann; und
- d) eine optische Verzögerungsvorrichtung, die alle oben genannten Vorteile aufweist.



## PATENTANSPRÜCHE

I. Elektrooptische Vorrichtung mit einer ferroelektrischen Keramikplatte, dadurch gekennzeichnet, dass die polykristalline Platte derart feinkörnig ist, dass sie optisch doppelbrechend wirkt, dass die Platte eine Anzahl stabiler elektrischer Polarisationszustände oberhalb der elektrischen Nullpolarisation, sowie eine elektrische Anfangsremanenzpolarisation bei einem dieser Zustände in einer bestimmten Richtung aufweist, ferner gekennzeichnet durch Mittel, der Platte polarisiertes Licht zuzuführen, durch Mittel, um die Grösse der elektrischen Polarisation der Platte in der genannten Richtung und damit die Grösse der genannten Doppelbrechung zu verändern, und durch Mittel, um die Änderung der Doppelbrechung zu erfassen.

II. Verfahren zum Betrieb der Vorrichtung nach Patentanspruch I, dadurch gekennzeichnet, dass ein Bündel von polarisiertem Licht durch die ferroelektrische Keramikplatte hindurch geschickt wird, dass das durch die Platte und einen Linearanalysator durchgehende Licht erfasst wird und dass die Grösse der elektrischen Remanenzpolarisation stufenweise geändert wird, um die doppelbrechenden Eigenschaften der Platte zu verändern.

## UNTERANSPRÜCHE

1. Vorrichtung nach Patentanspruch I, dadurch gekennzeichnet, dass die Mittel zum Erfassen der Änderung der Doppelbrechung einen Linearanalysator aufweisen, der im Strahlengang hinter der Keramikplatte angeordnet ist.

2. Vorrichtung nach Unteranspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Mittel zum Zuführen von polarisiertem Licht eine monochromatische Lichtquelle aufweisen.

3. Vorrichtung nach Unteranspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Mittel zum Erfassen der Änderung der Doppelbrechung ein Gerät zur Messung der

Intensität des durch den Linearanalysator hindurchgehenden Lichtes aufweisen.

4. Vorrichtung nach Unteranspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Mittel zum Zuführen von polarisiertem Licht eine weisse Lichtquelle aufweisen.

5. Vorrichtung nach Unteranspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Mittel zum Erfassen der Änderung der Doppelbrechung ein Wellenlängenmessgerät für das durch den Linearanalysator hindurchgehende Licht aufweisen.

6. Vorrichtung nach Patentanspruch I, dadurch gekennzeichnet, dass die Mittel zum Ändern der Polarisation ein Paar von Elektroden aufweisen, die auf der Platte in Richtung der ursprünglichen remanenten Polarisation angeordnet sind.

7. Vorrichtung nach Unteranspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass ein Impulsgenerator an die Elektroden angeschlossen ist, um elektrische Felder ausgewählter Polarität und Dauer an die Platte anzulegen.

8. Vorrichtung nach Unteranspruch 6, gekennzeichnet durch eine Matrixanordnung von Elektrodenpaaren.

9. Vorrichtung nach Unteranspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektroden rechteckig geformt sind, um eine gleichmässige elektrische Feldverteilung zwischen jedem Elektrodenpaar hervorzurufen.

10. Vorrichtung nach Unteranspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Anfangsremanenzpolarisation bei der Sättigungsremanenz liegt und dass die Mittel zum Ändern der Polarisation derart ausgebildet sind, dass sie die Polarisation über die Sättigungsremanenz steigern können.

11. Vorrichtung nach Patentanspruch I, gekennzeichnet durch Mittel, um Domänen der Platte aus einem stabilen Polarisationszustand in einen anderen stabilen Polarisationszustand umzuschalten.

United States Atomic Energy Commission  
Vertreter: Bovard & Cie., Bern

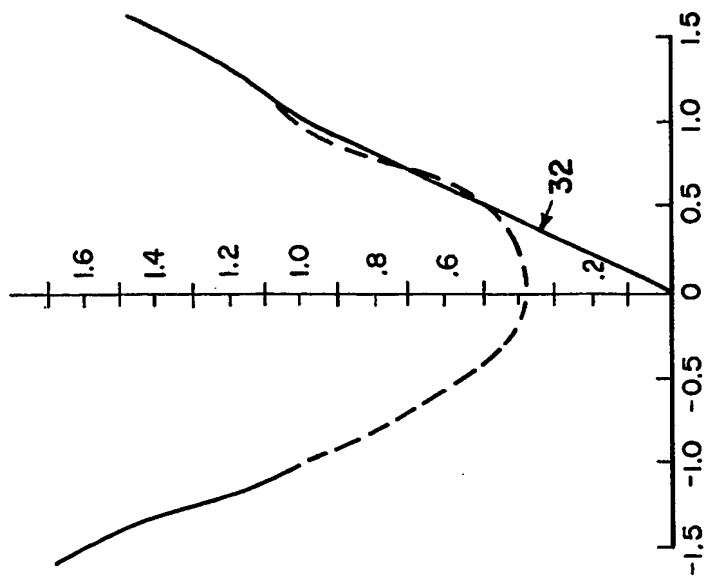


Fig. 1

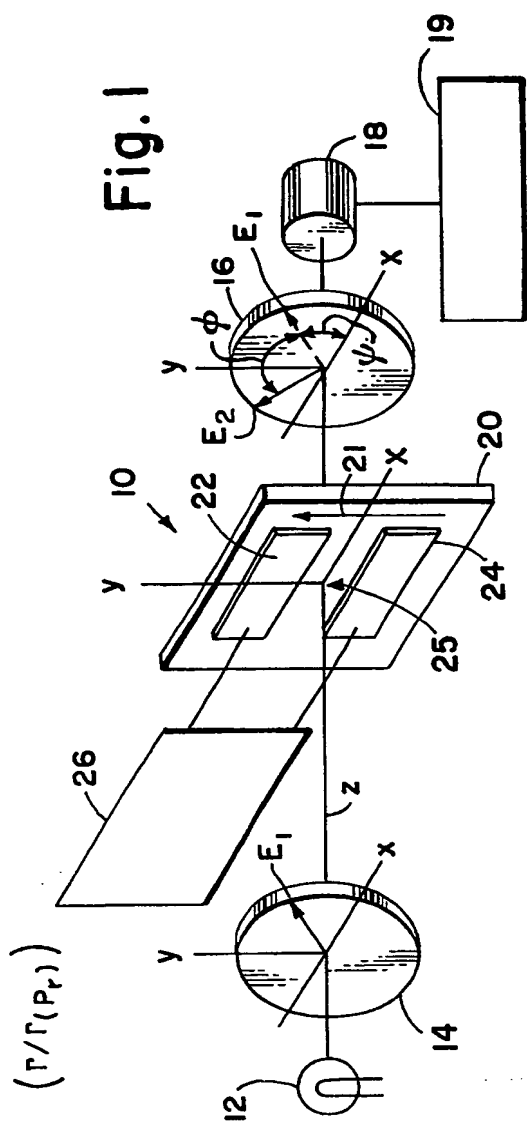


Fig. 4

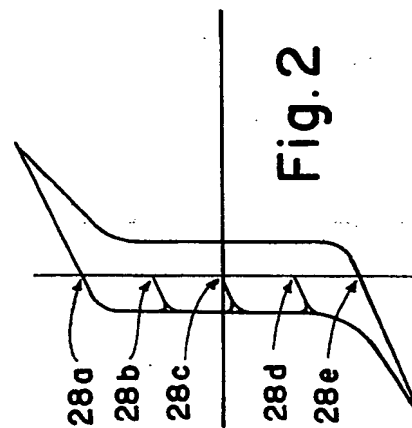


Fig. 2

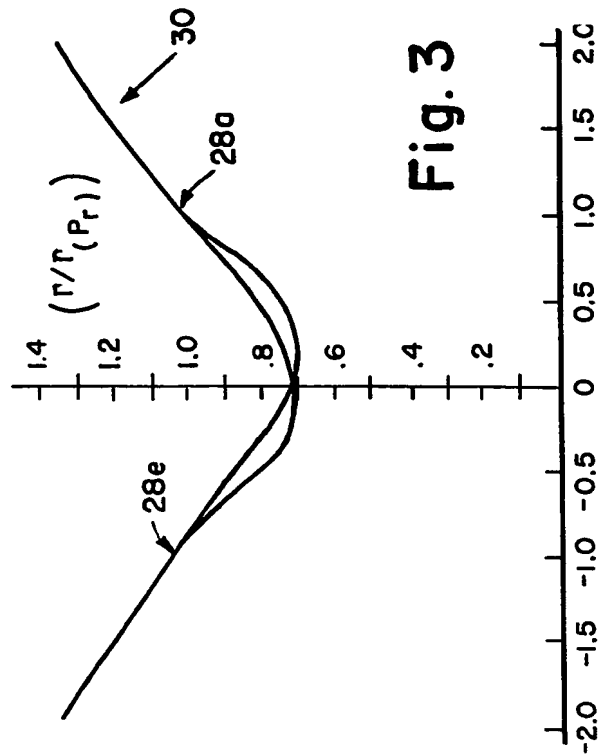


Fig. 3



Fig. 5

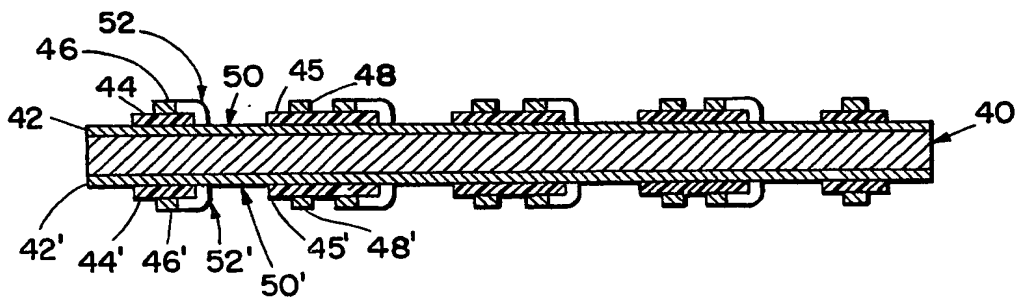
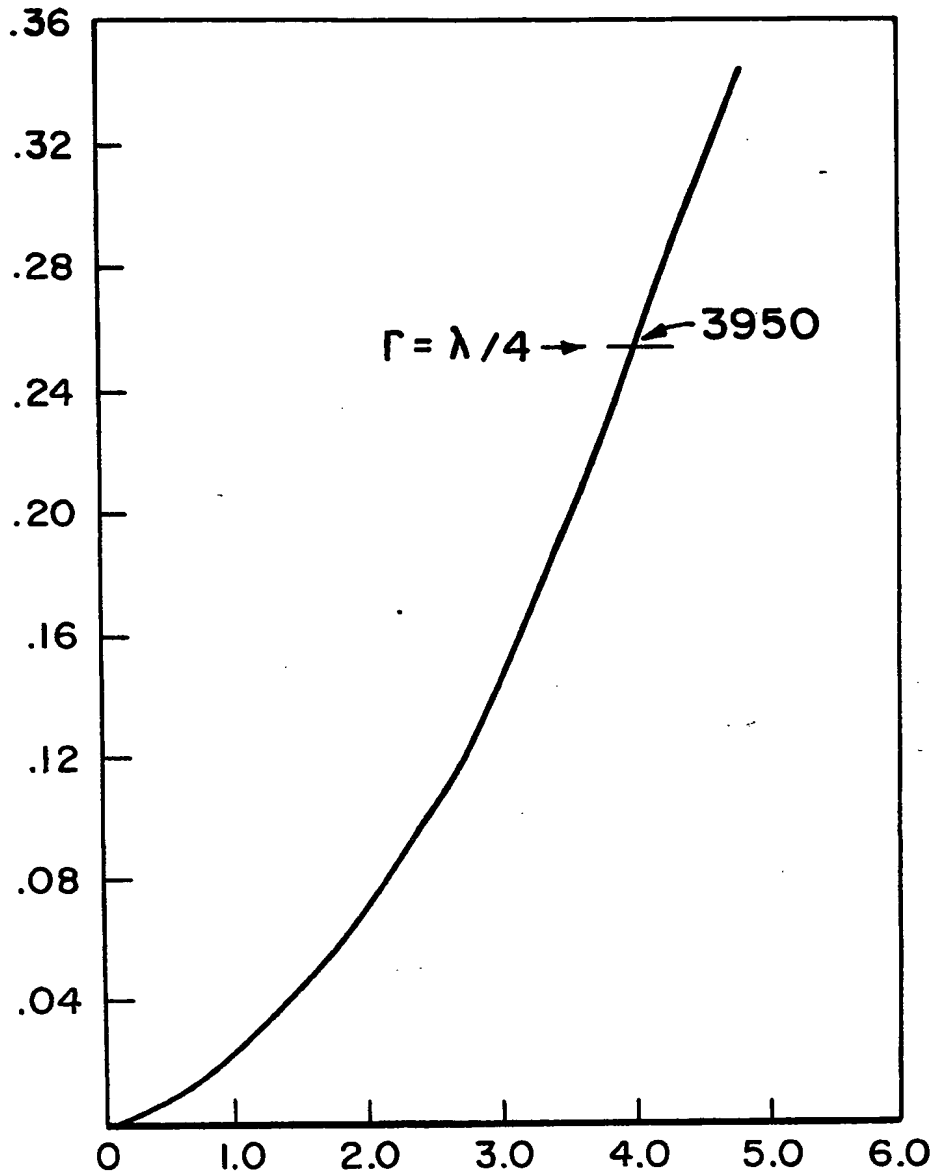


Fig. 7

